

РАДИАЦИОННАЯ КОЛЛИМАЦИЯ АТОМНОГО ПУЧКА ПУТЕМ ДВУХМЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В.И.Балыкин, В.С.Летохов, А.И.Сидоров

Исследовано двухмерное радиационное охлаждение пучка атомов натрия силами светового давления в аксиально-симметричной стоячей световой волне. Температура поперечного движения атомов уменьшена до 3,5 мК.

Со времени первого наблюдения¹ охлаждения атомов лазерным излучением, к настоящему времени наиболее значительные результаты достигнуты при лазерной монохроматизации и охлаждении атомных пучков^{2,3}. Полученные в указанных работах продольные скорости и температуры сравнимы с поперечными, поэтому следующим логическим шагом к достижению предельно низких температур является двухмерное охлаждение атомного пучка. Кроме того принципиально важным для многих экспериментов является уметь сжимать пучки, уменьшать их размеры и разброс импульсов (по величине и направлению), другими словами осуществлять их коллимацию.

О возможности уменьшения поперечных скоростей атомного пучка с помощью лазерного излучения упоминалось в работе⁴.

В настоящей работе мы впервые сообщаем о достижении радиационной коллимации и двухмерного охлаждения атомного пучка под действием интенсивного лазерного излучения.

Идея радиационной коллимации атомного пучка состоит в следующем. Пучок атомов (рис. 1), исходящий из источника 7, облучается аксиально-симметричным световым полем, частота ω которого сдвинута в красную область относительно частоты атомного перехода ω_0 . Аксиально-симметричное поле образовано посредством отражения лазерного излучения от зеркально-конической поверхности 5 отражательного аксиона. В аксиально-симметричном поле, создаваемом отражательным аксионом, на атом, скорость которого направлена от оси конуса, действует сила светового давления, которая при $\omega < \omega_0$ направлена к оси конуса. Благодаря действию данной силы, в области аксиально-симметричного поля происходит быстрое сужение скоростного распределения атомов поперек оси конуса. Последнее, в свою очередь, обуславливает резкое уменьшение угловой расходимости атомного пучка, т.е. коллимацию пучка.

Пучок атомов натрия формировался с помощью двух диафрагм диаметром 1 мм, одна из которых находилась на пушке 7, а другая – на расстоянии 14 см от пушки. Первоначальная расходимость атомного пучка $\Delta \phi_0 = 1,4 \cdot 10^{-2}$. На расстоянии 2 см от второй диафрагмы находился конус. Длина взаимодействия атомов с излучением внутри конуса равна 35 мм. Расстояние от пушки до зоны регистрации – 52 см. Для циклического взаимодействия использовалось излучение двухчастотного лазера на красителе 1, настроенного на компоненту D_2 – линии атома натрия. Разность частот была выбрана равной 1712 МГц так, чтобы одна частота возбуждала атомы с уровня $F = 1(3S_{1/2})$ на уровень $F' = 2(3P_{3/2})$, а вторая – с уровня $F = 2(3S_{1/2})$ на уровень $F' = 3(3P_{3/2})$. Часть двухчастотного излучения пересекала атомный пучок под углом 90° и служила для калибровки частотной шкалы.

Распределение интенсивности атомов в пучке от поперечной координаты регистрировалось по сигналу флуоресценции от одночастотного зондирующего поля, сканируемого по пространству. Пробное излучение пересекало атомный пучок под углом 10° . Частота пробного поля настраивалась на переход $F = 2(3S_{1/2}) - F' = 3(3P_{3/2})$ и устанавливалась в середине доплеровского контура атомного пучка, тем самым выбирались атомы с наиболее вероятной скоростью. Сигнал флуоресценции от зондирующего поля регистрировался после прерывания двухчастотного излучения. Эффективный диаметр пробного излучения в зоне регистрации равен 0,5 мм.

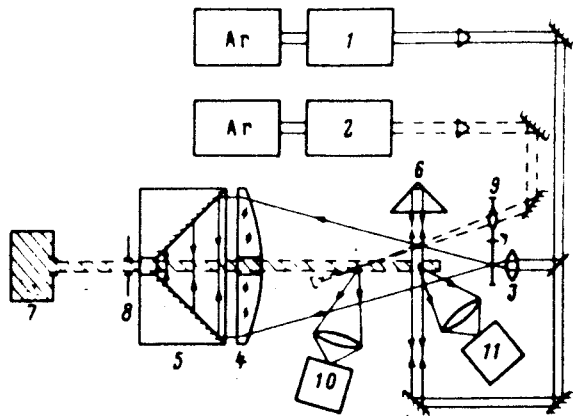


Рис. 1

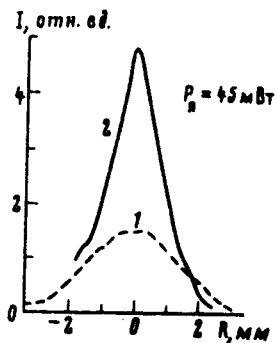


Рис. 2

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 2 – лазеры на красителях; 3, 4 – телескоп; 5 – аксион; 6 – призма; 7 – атомная пушка, 8 – дифракта; 9 – модулятор; 10, 11 – ФЭУ.

Рис. 2. Распределение интенсивности атомного пучка по поперечному сечению: 1 – интенсивность пучка до взаимодействия с лазерным излучением; 2 – после взаимодействия

Рис. 3. Зависимость интенсивности атомов в центре пучка от расстройки частот лазерного излучения относительно частоты атомного перехода при разных значениях мощности

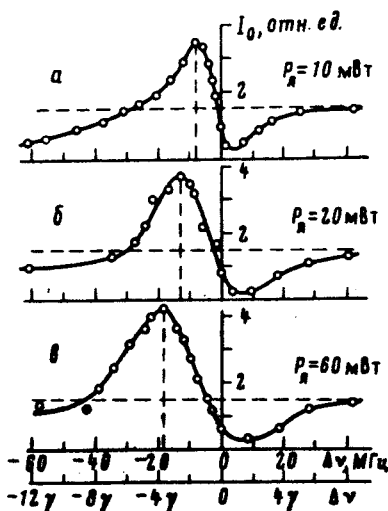


Рис. 3

На рис. 2 представлены профили атомного пучка до и после взаимодействия с двухчастотным излучением. Обе зависимости учитывают суммарный поток атомов на обоих подуровнях основного состояния атома натрия. Наблюдается увеличение интенсивности атомов в 3,5 раза, а также сужение (коллимация) атомного пучка. Измерение диаметра атомного пучка до взаимодействия с лазерным полем и после дает возможность рассчитать изменение поперечной скорости атомов в процессе их коллимации. Для случая, изображенного на рис. 2, расчет показывает, что поперечная скорость уменьшается с $5,5 \cdot 10^2$ см/с до $1,6 \cdot 10^2$ см/с. Это соответствует уменьшению температуры поперечного движения с 42 мК до 3,5 мК.

Нами были проведены измерения интенсивности атомов в центре пучка в зависимости от частоты коллимирующего лазерного поля (рис. 3). Как видно из рисунка, при отрицательных расстройках наблюдается коллимация пучка, при положительных наоборот – деколлимация. Такое поведение кривых подтверждает правильность интерпретации наблюдаемого эффекта действием силы светового давления, имеющей в поле стоячей световой волны дисперсионную зависимость от частоты лазерного поля⁵. Помимо сил светового давления на движение атомов оказывает влияние градиентная сила, используемая при больших значениях мощности для фокусировки атомных пучков⁶. Оценки показывают, что ее влияние в условиях рассматриваемого эксперимента пренебрежимо мало. Кроме того зависимость градиентной силы от частоты излучения носит симметричный характер относительно частоты атомного перехода в поле стоячей световой волны. Как видно из рис. 3 для каждой мощности су-

существует оптимальное значение частоты коллимирующего поля. С точностью до ошибки измерения оптимальная расстройка частоты коллимирующего поля зависит от интенсивности лазерного поля как $\gamma (1 + I/I_{\text{нас}})^{1/2}$, где I и $I_{\text{нас}}$ — соответственно интенсивность лазера и интенсивность насыщения, γ — радиационная ширина перехода, что согласуется с расчетами, сделанными в работе ⁵.

В заключение подчеркнем, что коллимация атомного пучка была осуществлена при большой тепловой скорости пучка и малой длине взаимодействия. Как показывают оценки, использование коллиматора большей длины или замедленного атомного пучка позволит в-первых существенно увеличить их плотность, во-вторых получить атомные пучки с предельно малой поперечной температурой.

Авторы выражают благодарность В.Г.Миногину за полезное обсуждение результатов.

Литература

1. Балыкин В.И., Летохов В.С., Мишин В.И. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 614.
2. Prodan J.V., Phillips W.D., Metcalf H. Phys. Rev. Lett., 1982, 49, 1149.
3. Balykin V.I., Letokhov V.S., Sidorov A.I. Opt. Comm., 1984, 49, 248; Балыкин В.И., Летохов В.С., Сидоров А.И. ЖЭТФ, 1984, 86, 2019.
4. Hänsch T.W., Schawlow A.L. Opt. Comm., 1975, 13, 68.
5. Летохов В.С., Миногин В.Г., Павлик Б.Д. ЖЭТФ, 1977, 72, 1328.
6. Bjorkholm J.E., Freeman R.R., Ashkin A., Pearson D.B. Opt. Lett., 1980, 5, 111.